

ITU-R S.1713 建议书

计算高地球轨道（HEO）业务弧上的非对地静止卫星与对地静止卫星
在地球表面最小隔离角的方法

（ITU-R 241/4 号研究课题）

（2005）

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 在大多数高地球轨道（HEO）卫星系统的设计中，每个卫星的远地点出现在其轨道的最高纬度点上，且每个卫星仅在远地点附近的业务弧内发射信号；
- b) 确定 HEO 系统和 GSO 系统出现最严重干扰的关键参数是最小隔离角，此时处于业务弧段的 HEO 卫星可被任何运行于 GSO 卫星系统中的地球站所观察到；
- c) 对于考虑到 a) 中所述系统，考虑到 b) 中所提到的最小隔离角在卫星业务弧的起点或终点（即业务弧的最低纬度点）出现；
- d) 地球站所观测到的 HEO 卫星的隔离角随地球站的经纬度及相关 GSO 卫星的经度而变化；
- e) 确定 HEO 系统和 GSO 网络之间的最小隔离角有利于迅速初步确定 HEO 系统和 GSO 系统的频带共用潜力，

建议

- 1 附件 1 中所述的方法可用于计算运行于某一给定 GSO 卫星系统中的特定地球站与所观察到的某一 HEO 卫星的隔离角；
- 2 附件 2 可用于确定由 HEO 卫星的干扰所造成的 GSO 链路噪声温度的增加。

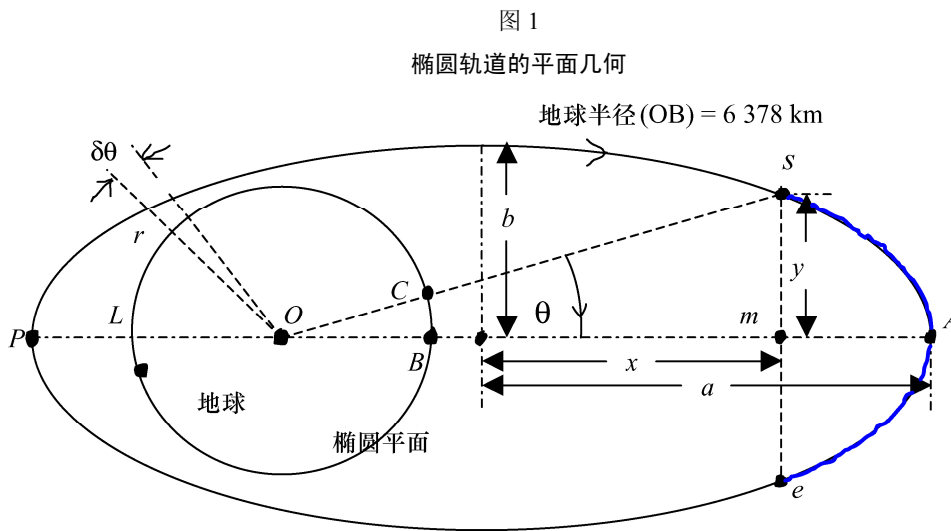
注 1 — 附件 3 通过对附件 1 和附件 2 中的方法进行迭代计算来确定最小隔离角，在该角度上，在某一 HEO 系统业务弧段中的卫星可被运行于 GSO 卫星系统中的任何地球站所观察到并进而计算 GSO 链路中最坏情况下噪声温度的增加。

注 2 — 附件 4 给出了应用附件 1 至附件 3 的实例。

附件 1

确定 HEO 干扰 GSO 下行链路的最小隔离角

图 1 是一个卫星围绕地球运转所形成的二维路径图形。一般来说这将是一个椭圆形轨道，两焦点之一与地球的重心重合(O)，且轨道平面倾斜于地球赤道平面（GSO 是个特例，这时椭圆变成赤道平面上的圆）。



在大多数 HEO 系统中，在这样轨道上运行的卫星仅在包含远地点(A)在内的有限弧段内发射（和接收）电信号，因此也就在该弧段上产生（或受到）干扰，该弧段通常被称为业务弧。由于大多数 HEO 系统采用的设计使其远地点出现在轨道的最高纬度点上，在这种情况下，最大干扰电平就可能出现在卫星位于业务弧的起点或终点时。不同的系统，业务弧的长度不同。如图 1 所示，业务弧起始点为 (s)，终止点为(e)。轨道动力学表明，卫星在近地点(P)附近运行较快，而在远地点附近运行相对较慢（事实上整个轨道内单位时间矢径 r 扫过的面积，即 $r^2/2 \cdot \delta\theta/\delta t$ 是恒定的）。

步骤 1 这里第一步由轨道基本特性确定长度 Os 。

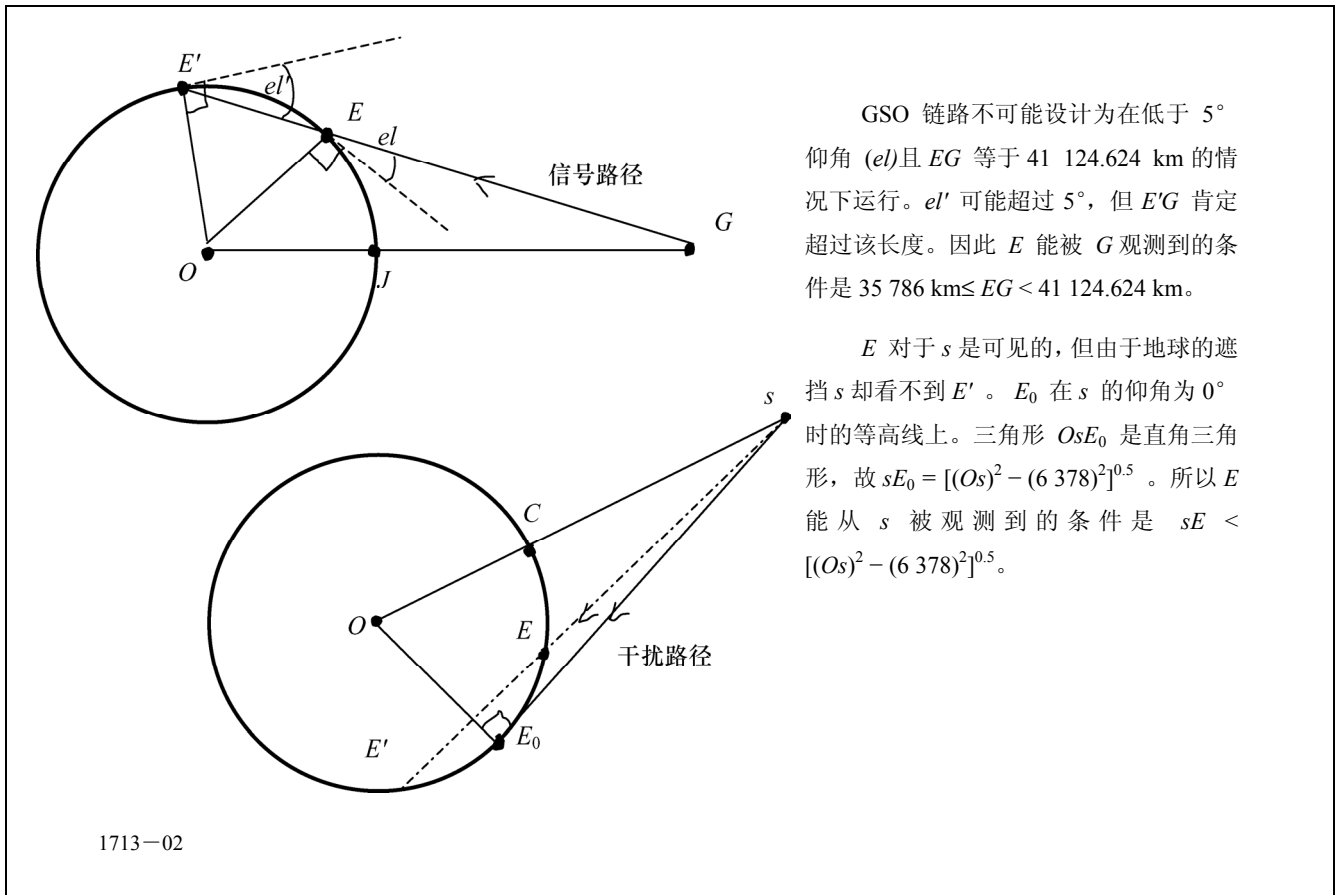
通常提供给 ITU-R 的涉及 HEO 系统的信息包括：远地点高度(AB (km))；近地点高度(PL (km))；离心率(ϵ)；轨道倾角(i°)；业务弧起点（终点）的真近点角(见图 1：角 PO_s ，即： $180^\circ - \theta^\circ$)。

时间可作为起点 s 和终点 e 真近点角的替代表达方式，通常给出卫星从起点 s 运行到远地点和从远地点运行到终点 e 的时间，例如 ± 4 小时。这样， θ 角就可以通过时间步进模拟算法或根据 $r^2/2 \cdot \delta\theta/\delta t$ 是常数求积分而推算出来，但相对而言，这两种方法都比较复杂。对于 ITU-R 的研究来说，如明确给出 s (或 e) 的真近点角或角 θ 将更为方便，这是在此的假设；然而本建议书所附的 EXCEL 表电子文件包含了 VB 程序用以计算 θ 角，依据是卫星到达远地点以前的时间；此时卫星位于 s 点（或卫星处于远地点以后的时间；此时卫星到达 e 点）。

可能注意到当任何非 GSO 卫星系统的申报资料提交到无线电通信局 (BR) 时,《无线电规则》(RR) 附录 4 所要求提供的信息包括远地点高度、近地点的高度及离心率,但目前对于涉及到 HEO 类型的非 GSO 系统的业务弧的范围并未列入到所要求提供的数据之中。然而,对于计划使用受第 22 条等效功率通量密度限制频带的非 GSO 系统(无疑包括 HEO)来说,RR 附录 4 要求的参数之一是该系统中的任一卫星在发射电信号时与地面的最低高度。对于 HEO 卫星来说就是图 1 中的 sC 。

根据图 1,应用椭圆和平面三角公式,通过 AB 、 PL 、 ϵ 和 θ 可以建立 x 的二次方程,然后求出 x , 长度 Os 也可通过三角形 Oms 得出。

图 2
平面三角局部图



步骤 2 第二步确定 s 的纬度和经度,该经度是相对于此时远地点的经度。如图 3 所示,这是轨道的三维表示法并采用与图 1 相同的符号 — 这样 Os 可从第一步中计算出来。通过对图 3 球面三角形 $OBCD$ 和 $CODF$ 应用球面余弦定理,而后对球面三角形 $ONBC$ 应用球面正弦定理,则 s 相对于远地点 A 的经度 (α_c) 和纬度 (λ_c) 可通过下面公式得出:

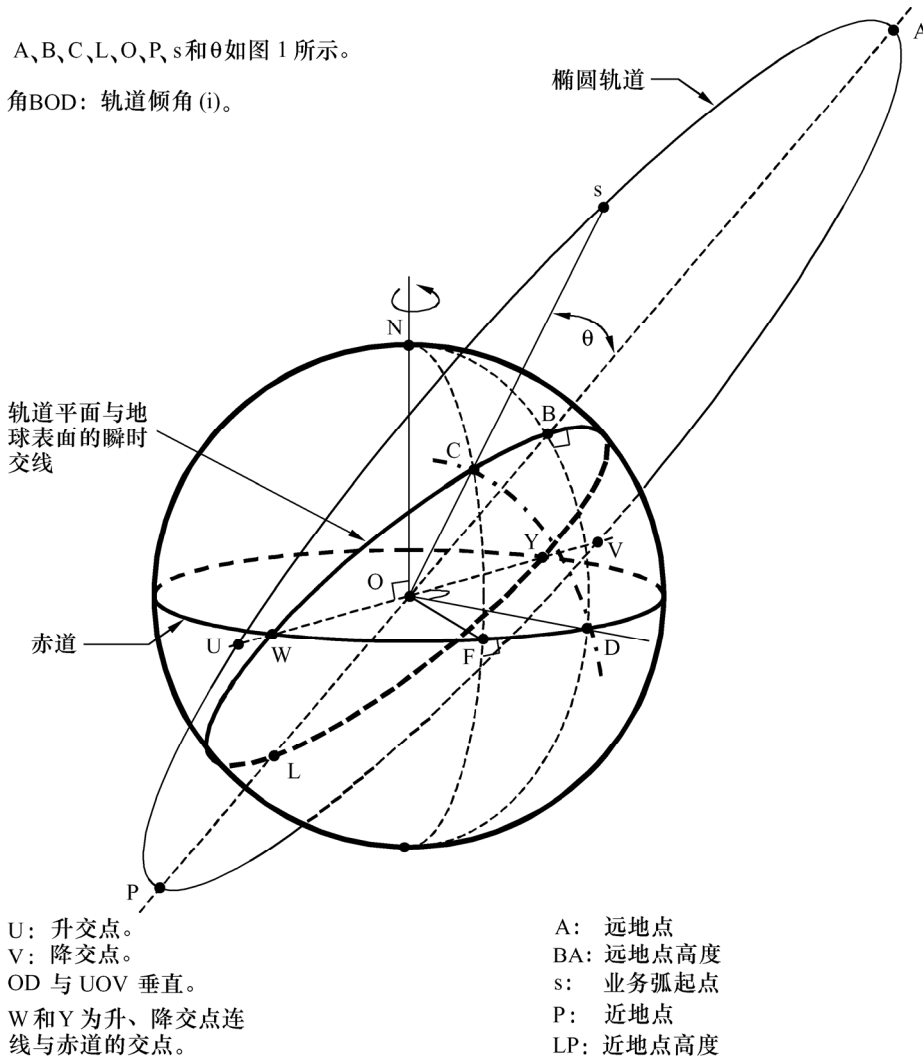
$$\alpha_c = -\angle FOD = -\tan^{-1}[\tan(\theta) / \cos(i)] \text{ and } \lambda_c = \angle FOC = \cos^{-1}[\sin(\theta) / \sin(\alpha_c)]$$

图 3

HEO 业务弧起点的地理坐标

A、B、C、L、O、P、s 和 θ 如图 1 所示。

角 BOD: 轨道倾角 (i)。



1713-03

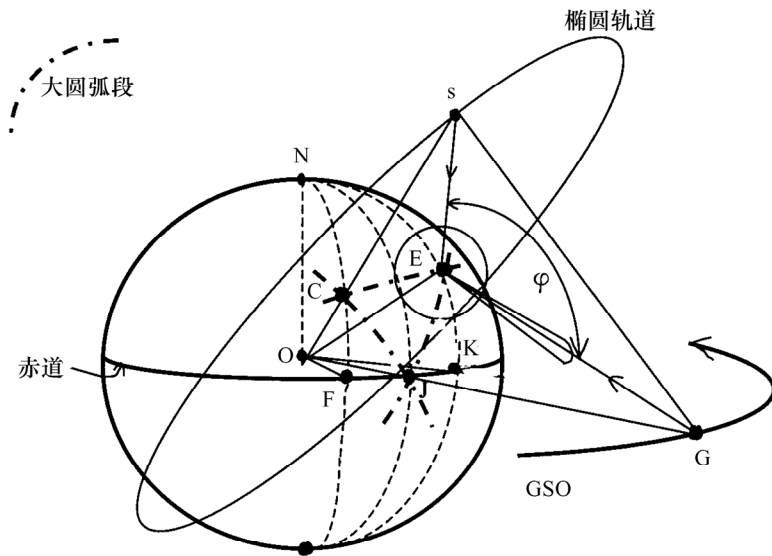
步骤 3 确定了 s 的纬度和瞬时相对经度，利用图 4 可计算出相应的运行于任一对地静止轨道卫星系统(G)的任一地球站 (E) 的干扰隔离角(φ)，图中点 C 、 O 、 F 、 N 和 s 与图 3 是相同的。这样在图 4 中 E 点的纬度是 λ_E ，它相对于 A 点的经度是 α_E ， G 点相对于 A 点的经度是 α_G 。那么由于 α_C 、 α_E 、 λ_C 、 λ_E 、 α_G 、 OE (地球半径)、 OG (GSO 半径) 和 Os 是已知的或已被计算出来，则

- 通过对球面三角 $ONCE$ 应用球面余弦定理，然后对平面三角形 OsE 应用平面余弦定理，可以求出长度 sE ；
- 通过对球面三角 $OCFJ$ 应用球面余弦定理，然后对平面三角形 OsG 应用平面余弦定理，可以求出长度 sG ；
- 通过对球面三角 $OEJK$ 应用球面余弦定理，然后对平面三角形 OEG 应用平面余弦定理，可以求出长度 EG 。

最后在平面三角形 EsG 中，由于其三个边 sE 、 sG 和 EG 都已知，则角 φ 可通过平面余弦定理求得。

图 4

HEO 卫星在业务弧起点干扰 GSO 网络地球站
(即路径 sE) 的几何图



C、F、N、O 和 s 如图 3 所示。
G: 对地静止卫星, 和
E: 接收 G 点卫星信号的地球站

4/48-0304
186767

1713-04

这样, 如果知道 HEO 的轨道倾角、远地点高度、近地点高度、离心率以及真近点角或业务弧起点(或终点)相对于远地点的时间, 那么通过这一系列的步骤, 就可针对任何 GSO 下行链路计算出干扰隔离角度(φ) (即处于任何地理位置的地球站接收来自于任何经度 GSO 卫星信号的隔离角度)。

为了找到 φ 的最小值, 可以编写一个简单的循环计算程序, 并通过一系列的 α_E 、 λ_E 和 α_G 数值, 计算相应的 φ 值, 然后选择其中的最小值。由于干扰仅发生在从 G 和 s 都可观测到 E 时所对应的一系列 α_E 、 λ_E 和 α_G 数值 (见图 4), 所有这些数值都必须加以研究, 这样通过该循环计算程序, 就可以容易地计算出这三个变量的各种不同组合情况, 然后从中去除掉不符合条件的数值: 即由于地球的障碍无法从 G 或 s 看到 E 或者从 G 和 s 都不能观测到 E 的情况。参见如下平面三角局部图 2 (取自图 4)。

附件 2

**计算由于 HEO 卫星在业务弧起点产生干扰
所造成的 GSO 链路噪声的增加**

由图 4 可以看出，位于 s 点的 HEO 卫星对静止轨道 G 点的卫星和 E 点的地球站之间链路产生的干扰将通过天线方向图的旁瓣进入地球站接收机。相应的 GSO 链路噪声温度的增加为：

$$10\log[(\Delta T/T)/100] = E_1 - 20\log(4\pi d/\lambda) + G(\varphi) - 10\log(kT) \text{ dB}$$

其中：

$\Delta T/T$ = 链路噪声增加百分比

E_1 = HEO 卫星所发载波的 e.i.r.p.密度，dB(W/Hz)

d = 干扰路径 sE 的长度 (m)

λ = 波长 (米) = $(0.3)/f$ ，其中 f 是 HEO 的载波频率 (GHz)

$G(\varphi)$ = 地球站天线在离轴角度为 φ ，频率为 f 时的接收增益 (dBi)

T = GSO 链路的噪声温度 (K)；和

k = 玻耳兹曼常数，即 $10 \log(k) = -228.6 \text{ dB (W/Hz} \cdot \text{K)}$ 。

T 既可以单指 GSO 下行链路的噪声温度，又可指 GSO 系统相对于地球站接收机输入端的噪声温度，这取决于倾向于怎样表达 $\Delta T/T$ 。

至于 $G(\varphi)$ 的计算，由于此附件中的方法涉及到非 GSO 系统与 GSO 系统的干扰，所以可以采用 ITU-R S.1428-1 建议书中的增益方向图，其中 $G(\varphi)$ 以 D/λ 表示， D 是天线直径 (m)。

附件 3

附件 1 中方法的迭代应用

附件 1 所述的计算步骤是通过所附的 EXCEL 电子表单具体实现的，它包含 VB 循环计算程序，采用的参数包括不同时刻的地球站纬度、经度以及 GSO 卫星的经度，此时 GSO 卫星和 HEO 系统业务弧的起点同时可见，从而确定可能发生相互干扰的任一地球站与 HEO 卫星的最小隔离角度。为方便用户，如果需要可将附件 2 中的简单计算合并到上述表单中，从而得出对应于此干扰的 $\Delta T/T$ 最大值。附件 4 中的实例明确显示出表单涵盖了所有使用有限业务弧的轨道类型，前提是该弧段与 GSO 与地球表面任一点连线的交线不包括 $\pm 81.3^\circ$ 纬度点。

HEO 系统所需的输入参数如下：

- 远地点高度 (km)；
- 近地点高度(km)；
- 离心率 (< 1)；
- 轨道倾角 (度)；
- 三个参数中的一个（或多个）用于确定业务弧的起点“ s ” (或终点“ e ”)；
 - 即： s 和 远地点之间的地心角 ($^{\circ}$)，
 - 或者是卫星在 s 到远地点之间运行所需的时间 (h)*，
 - 或者是 s 的高度(km)，

如果希望得到相应的 $\Delta T/T$ 值，需要输入下列附加参数：

- HEO 卫星最大 e.i.r.p. 密度 (dB(W/Hz))；

和下列 GSO 链路参数：

- GSO 链路地球站天线的直径(m)；
- GSO 链路地球站天线的接收增益方向图 (dBi，相对于离轴角度)；
- GSO 链路的噪声温度 ($^{\circ}\text{K}$)；
- 频率 (GHz)。

附 件 4

方法应用实例

表 1 的第 2 和第 8 行，列出了 12 种不同设计类型的 HEO 系统的轨道特性，这些特性参数取自 ITU-R 所收到的申报信息。为了说明这些系统，图 5-7 比较了它们不同的地球轨迹类型。表 1 的第 11 行给出了远地点的经度，用于画出图 5-7；选择这些远地点的经度仅是为了图示的方便，没有其他意义。

1 为利用这些数据，附件包括了一个附加的 VB 程序。如果输入数据，不仅可以计算出最小隔离角，而且可计算出此时地球站和 GSO 卫星的绝对位置，前提是附加输入 HEO 远地点的经度值。详见文件名为“MinseparationHEOangle”的 EXCEL 相关文件。



"MinseparationHEO
angle C.xls"

表 1

1. HEO 系统	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. 远地点高度(km)	35 970	44 640.5	39 000	35 800	52 700	40 000	50 400	27 288.3	20 180	34 800	39 300	27 470
3. 近地点高度(km)	4 500	26 931.5	500	35 800	18 900	31 600	21 200	517.4	20 180	20 600	1 075	310
4. 轨道离心率	0.59	0.21	0.74	0	0.4	0.1	0.347	0.66	0	0.55	0.72	0.67
5. 轨道倾角 (度)	50	42.5	63.43	63.4	60	40	63.4	63.435	63.4	45	63.4	45
6. 起点 s 相对于远地点的角度 (度)	35	31	(29.5)	60	(30)	37	(24)	40	(30)	(32.3)	25	(28)
7. 起点 s 相对于远地点的时间 (h)	(-3.13)	(-3)	-3.5	(-4)	-4	(-2.95)	-3	(-2.55)	-1	-4	(-3.06)	-2
8. 起点 s 的高度 (km)	(27 200)	(42 800)	(26 900)	N/A	(48 000)	(39 000)	(47 900)	(16 500)	N/A	(30 850)	(30 700)	(21 400)
9. 最小隔离角 (度)	39.85	35.84	52.50	26.94	49.35	31.34	55.49	40.05	51.84	37.63	55.51	37.98
10. 模拟验证(度)	(39.78)	(35.78)	(52.50)	(26.86)	(49.25)	(31.40)	(55.47)	(40.91)	(51.86)	(37.47)	(55.49)	(37.26)
11. 远地点的经度 (°E)	-150	-108	-62	-43	-130	-38	-110	-83	-30	-18	27	57
12. 地球站的经度 (°E)	-97.63	-110.81	14.89	17.33	-43.32	38.65	-34.89	-75.38	-35.33	76.7	101.86	82.72
13. 地球站的纬度(°N)	73.63	-46.70	2.58	-7.73	-3.15	-5.44	-2.01	73.63	73.63	-0.86	1.43	73.63
14. GSO 卫星的经度 (°E)	-130.29	-102.22	-61.32	-58.88	-119.52	-37.55	-111.09	-108.04	-67.99	0.50	25.66	50.06
15. $\Delta T/T$ (%) 的实例*	0.204	0.072	0.150	0.200	0.058	0.108	0.058	0.572	0.386	0.128	0.122	0.312

* 通过附件 2 的计算值, 已知 $E_1 = -21$ dB(W/Hz), $D = 3$ m, $T = 100$ K, $f = 11$ GHz。 $G(\phi)$ 取自 ITU-R S.1428-1 建议书。

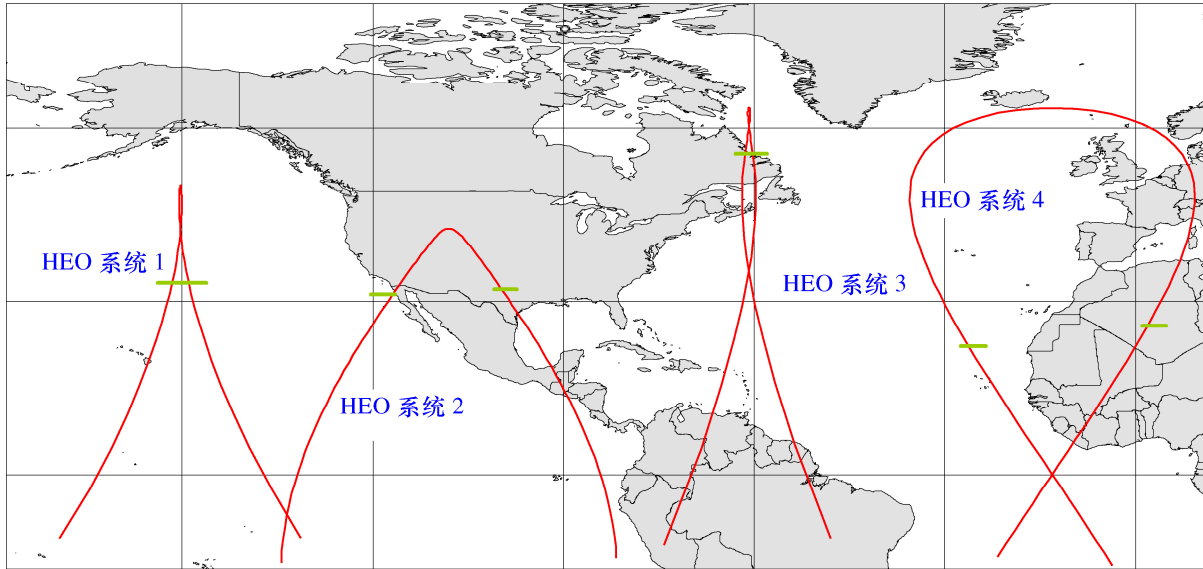
N/A: 不能获得。

第 6、7 和第 8 行给出了业务弧起点 (或终点) 的不同表达方式。在这三行中未加括号的是报送给 ITU-R 的数据; 加括号的来源于计算机对每个系统的模拟, 每次程序的运行将终止于未加括号的数值处并对另外两个括号内的值给出相应的注释。通过采用未加括号的数值所确定的业务弧的起点, 并根据附件 3 得出了第 9 行中的计算结果。(在附件 3 中使用加括号的数值时, 结果稍有不同, 但差别在计算允许的精度范围之内)。计算机模拟程序验证每一个结果, 并得出在第 10 行用斜体字表示的最小隔离角; 可以看出它们与第 9 行的值十分接近, 由此证实了附件 3 的正确性。

此外, 根据第 11 行的远地点经度, 通过应用附件 3 可以针对每一实例求出对应于最小离轴角的地球站与 GSO 卫星的相应位置, 这些数据列在表的第 12、13 和 14 行中。

图 5

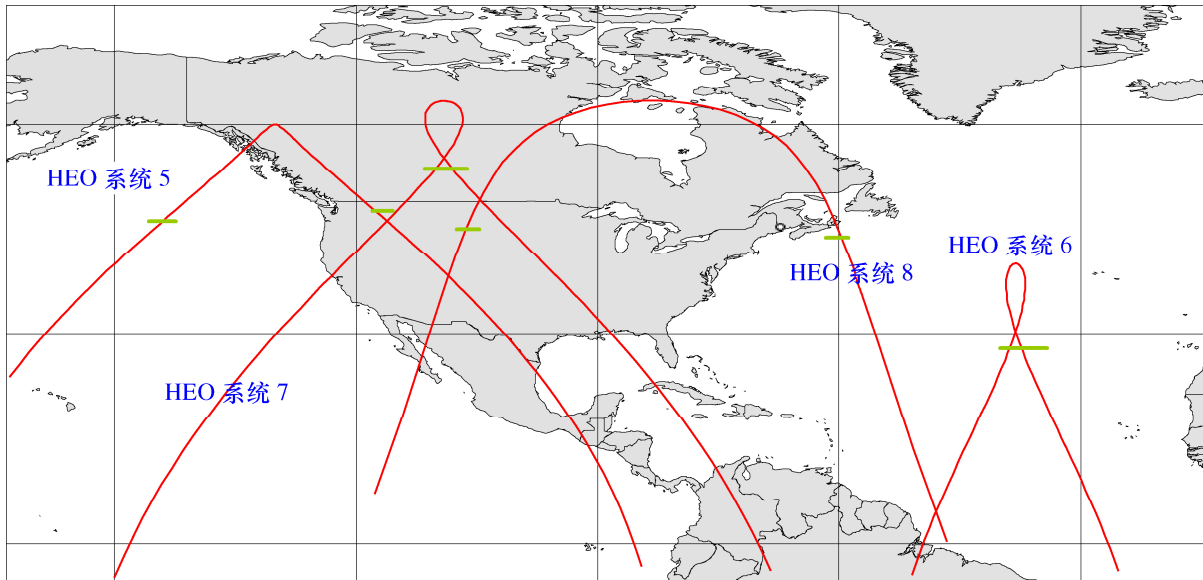
第 1 到第 4 类 HEO 系统的地球轨迹局部图，同时显示业务弧 (即—之上的部分)



1713-05

图 6

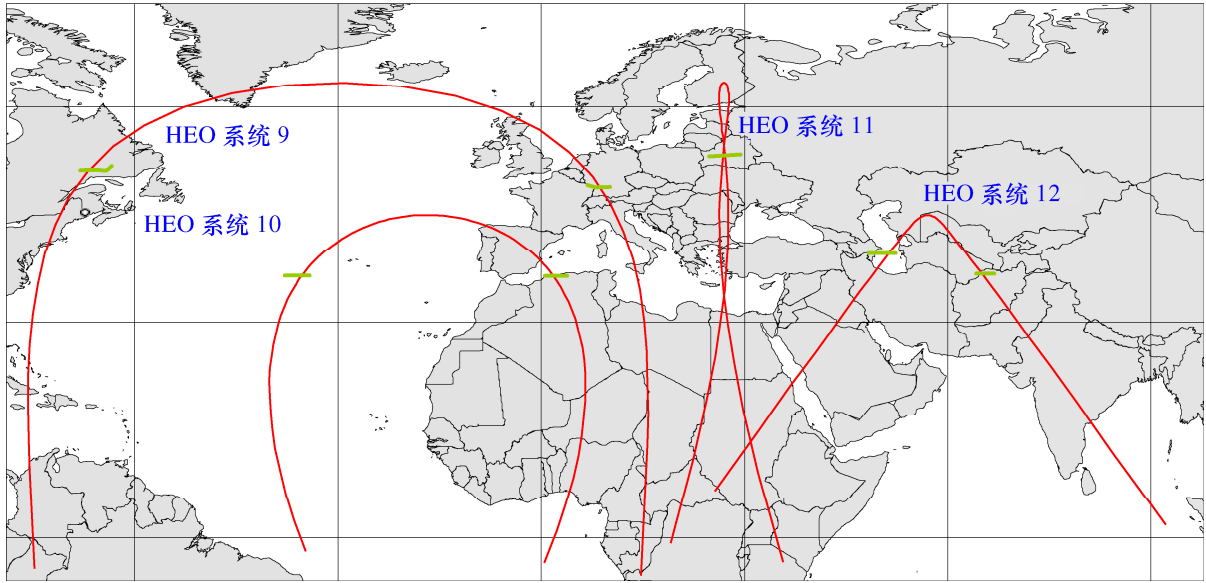
第 5 到第 8 类 HEO 系统的地球轨迹局部图，同时显示业务弧



1713-06

图 7

第 9 到第 12 类 HEO 系统的地球轨迹局部图，同时显示业务弧

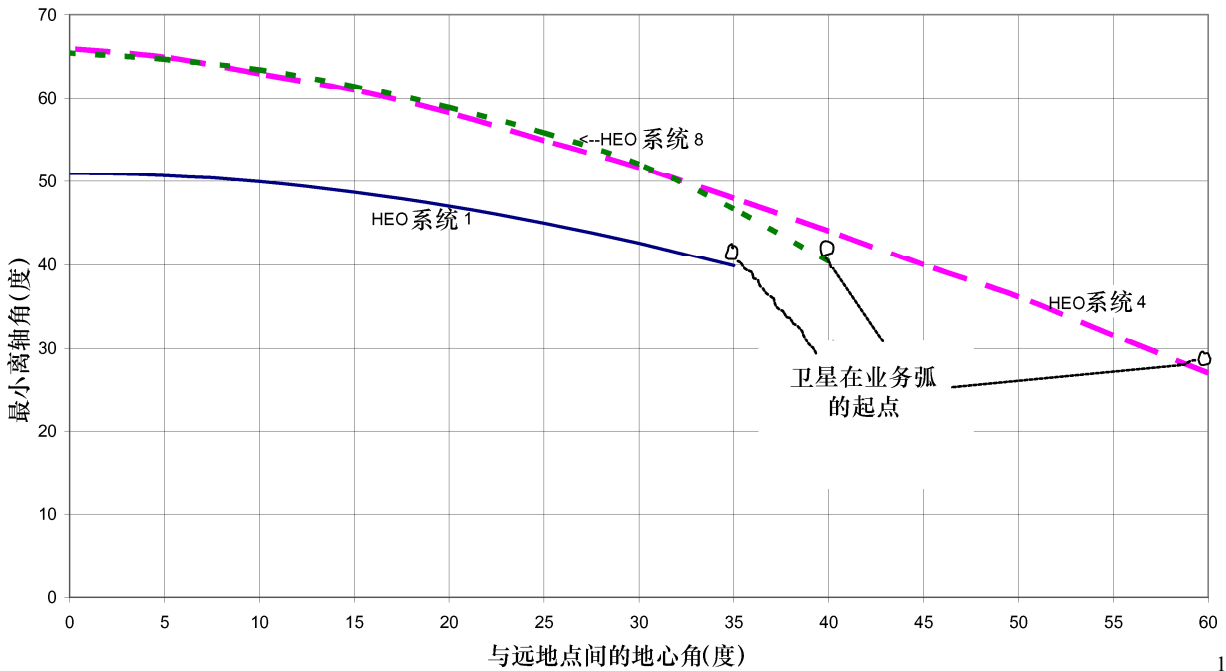


1713-07

最后，附件 3 的正确性提供了一种有效的方法来验证考虑到 c) 在这些实例中的真实性。这可通过第 1、4 和第 8 这些广泛的系统类型来说明，它们通过不断减小 HEO 卫星和远地点间的地心角 θ 来确定最小离轴角（或隔离角）。结果在图 8 中用图表示出。

图 8

针对 HEO 卫星与远地点的距离得出的最小离轴角曲线



1713-08

对于典型的 HEO 系统，图 8 清楚地表明卫星距轨道的远地点越远，从运行于对地静止卫星系统中的地球站所观察到的最小离轴角也就越小。
